文章编号:1001-5078(2010)07-0700-06 ·激光器技术·

# 脉冲半导体激光器光束并合技术研究

吴健华[1],樊桂花[2],梁丹华[2],郭惠超[1],田 野[3]
(1.装备指挥技术学院研究生院,北京 101416;2.装备指挥技术学院光电装备系,北京 101416;3.西安交通大学,陕西 西安 710049)

**摘 要**:为了提高脉冲半导体激光器达到远场的能量密度,提出采用多个脉冲半导体激光器并合的方法来解决。介绍了光束并合的原理,并且就影响光束并合的因素进行了理论分析与推导,然后采用 Matlab 模拟分析了各个激光器出光时间同步性对光束合成功率密度与脉宽的影响,以及采用 Zemax 仿真分析了各个激光器间的轴线平行性以及激光器与准直系统间的同轴性对合成光斑质量的影响,最后通过具体的距离选通实验,验证了光束并合是一种有效地图像提高远场能量密度的手段。

**关键词**:脉冲半导体激光器;距离选通成像;光束并合;峰值功率
**中图分类号**:TN24 **文献标识码**:A

# Study on beam synthesis of pulsed diode laser

WU Jian-hua[1],FAN Gui-hua[2],LIANG Dan-hua[2],GUO Hui-chao[1],TIAN Ye[3]
(1. Department of Postgraduate,the Academy of Equipment Command & Technology,Beijing 101416,China;
2. Department of Optical and Electrical Equipment,the Academy of Equipment Command & Technology,Beijing 101416,China;
3. Xi'an Jiaotong University,Xi'an 710049,China)

**Abstract**:In order to enhance the energy intensity of a diode laser in far field,a method is proposed to synthesize the beams of mary diode lasers. Theoretical analysis and simulation with Matlab were made to analysize the effect of the synchronized porformance of the laser on the power density and pulse width. With the use of Zemax,analysis was also made to evaluate the influence of the parallelism of the lasers on the quality of the synthenized beam. The practical experiment prove that the beam synthesis is an effective mean to highten the far field energy density.

**Key words**:pulsed laser diode;range gate of laser active illuminated imaging;laser beam combining;peak value of power

## 1 引 言

距离选通成像由于可以克服大气的后向散射问题而受到人们的广泛关注[1-2],作为距离选通成像关键技术之一的激光光源,直接影响着成像质量的好坏。距离选通成像对激光光源的基本要求是:较高的峰值功率、较窄的脉冲宽度以及大气传输性能好[3],扩展要求为:激光器体积要小、可靠性高、波长范围宽、电光转化效率高等。通过基本要求以及扩展要求等多方面考虑,当前常用的激光源(YAG 激光器、$CO_2$ 激光器以及半导体激光器)[4-5]中,脉冲半导体激光器是最适合作为距离选通成像的光源。但是,单独的脉冲半导体激光器的功率较低,必须通过光束合成的方法来提高激光到达远场的峰值功率。

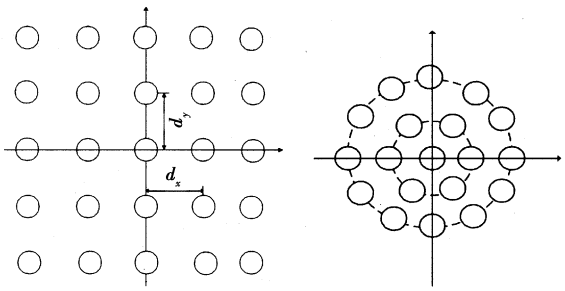
半导体激光器光束合成的方法可以分为相干合成的方法[6-10]、谱合成的方法[11-14]以及阵列式光束合成的方法[15-18]。这些方法虽然能够提高光束合成后的激光功率,获得较好的光束质量,但是激光器只能工作在连续或者准连续的条件下,不能满足精确的距离选通成像要求。采用多个脉冲半导体激光器并合的方法,可以在提高输出光功率的基础上,

**作者简介**:吴健华(1985-),硕士研究生,主要研究方向为空间光学测量。E-mail:jianhuafly@163.com
**收稿日期**:2010-01-27;**修订日期**:2010-04-06

保持脉冲宽度和重复频率不变,满足精确的距离选通成像要求。文中对多个单管脉冲半导体激光器进行了光束并合研究,介绍了光束并合基本原理,仿真分析了影响光束并合性能的主要因素,提出了解决方法,最后给出了实验图像进行验证。

## 2　光束并合的基本原理

光束并合中激光器的排列方式有两种:矩形排列方式[19]和圆环排列方式[20],如图 1 所示,以矩形排列方式为例,通过推导得到脉冲半导体激光器光束并合的表达式。




(a)矩形排列方式　　(b)圆环排列方式

图 1　光束并合排列方式

采用矩形排列方式时,各个激光器间距为 $d_x$ ($X$ 方向)与 $d_y$($Y$ 方向),设激光器的数量分别是 $M$($X$ 方向),$N$($Y$ 方向),为推导方便,设 $M,N$ 为奇数。此时,设某个激光器的序号为($m,n$),其中 $m,n$ 的取值范围是:$-\frac{M-1}{2}\leqslant m\leqslant\frac{M-1}{2}$, $-\frac{N-1}{2}\leqslant N\leqslant\frac{N-1}{2}$,则其所处位置坐标为($md_x,nd_y$),利用指数高斯模型[21],当采用非傍轴理论时,位于($md_x,nd_y,0$)处的光场分布为:

$$E_{mn}(x_0,y_0,0)=u_0\exp(-p|x_0-md_x|)\cdot\exp\left(-\frac{(y_0-nd_y)^2}{\omega_{oy}^2}\right)\tag{1}$$

其中,$p=1/\omega_{ox}$;$\omega_{ox}$ 为 $X$ 方向的束腰宽度;$\mu_0$ 为常数。采用非傍轴标量理论得到远场光强分布为:

$$I_{mn}(x,y,z)=\frac{4p}{q}\frac{u_0^2}{l^2p^2}\left(\frac{z}{r^2}\right)^2\left(\frac{\Gamma}{\Gamma^2+(x-md_x)^2}\right)^2\cdot\exp\left(-\frac{2(y-nd_y)^2}{\Omega^2}\right)\tag{2}$$

其中,$\Gamma^2=(pk/r)^2$;$\Omega^2=4q^2r^2/k^2$,$q=1/\omega_{oy}$。$\lambda$ 为出射激光的波长;$k$ 为波矢;$r$ 为传输距离;$r=\sqrt{x^2+y^2+z^2}$;$\omega_{oy}$ 为 $Y$ 方向的束腰宽度,则总光强为:

$$I(x,y,z)=\sum_{m=-\frac{M-1}{2}}^{\frac{M-1}{2}}\sum_{n=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}}\frac{4p}{q}\frac{u_0^2}{l^2p^2}\left(\frac{z}{r^2}\right)^2\cdot\left(\frac{\Gamma}{\Gamma^2+(x-md_x)^2}\right)^2\exp\left(-\frac{2(y-nd_y)^2}{\Omega^2}\right)\tag{3}$$

采用矢量理论,推导得出光强分布为:

$$I_{mn}(x,y,z)=\frac{u_0^2p}{l^2q}\exp\left(\frac{-k^2(y-nd_y)^2}{2qr^2}\right)\cdot\left\{\left(\frac{2p(x-md_x)}{p^2r^2+k^2(x-md_x)^2}\right)^2+\left(\frac{2pz}{p^2r^2+k^2(x-md_x)^2}\right)^2+\left[\frac{4pk(x-md_x)r}{(p^2r^2+k^2(x-md_x)^2)^2}\right]^2\right\}\tag{4}$$

则总光强为:

$$I(x,y,z)=\sum_{m=-\frac{M-1}{2}}^{\frac{M-1}{2}}\sum_{n=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}}\frac{u_0^2p}{l^2q}\exp\left(\frac{-k^2(y-nd_y)^2}{2qr^2}\right)\cdot\left\{\left(\frac{2p(x-md_x)}{p^2r^2+k^2(x-md_x)^2}\right)^2+\left(\frac{2pz}{p^2r^2+k^2(x-md_x)^2}\right)^2+\left[\frac{4pk(x-md_x)r}{(p^2r^2+k^2(x-md_x)^2)^2}\right]^2\right\}\tag{5}$$

通过上面的式(3)、式(5)可以看出,采用光束并合的方法,可以有效地图像提高远场光束能量,从而提高距离选通成像系统的作用距离。

## 3　脉冲半导体激光器光束并合的影响因素

在半导体激光器光束并合中,各激光器出光时间的同步性、激光器之间的轴线平行度以及激光器与准直系统间的同轴性等都将影响并合后的光束性能。

### 3.1　各个激光器出光时间同步性

半导体激光器是电流驱动型的器件,随着激光器注入电流的增加,其输出光功率增加,但不是成简单的线性关系,而是存在一定的阈值 $I_{th}$。在输入电流小于 $I_{th}$时,激光功率随着电流增加而缓慢升高,此时发光为荧光,是光谱很宽、相干性很差的自发辐射光;当电流大于 $I_{th}$后,输出光功率随注入电流快速增加,且成线性变化,此时发射出激光,是光谱很窄、相干性很强的受激辐射光[22]。在阈值电流以上,由于驱动电流与光功率成线性关系,因此,可以通过合成光束的驱动电流值来反映合成的光功率变化。经过理论推导计算[23],可得第 $i$ 个激光光功率与时间的关系为下式:

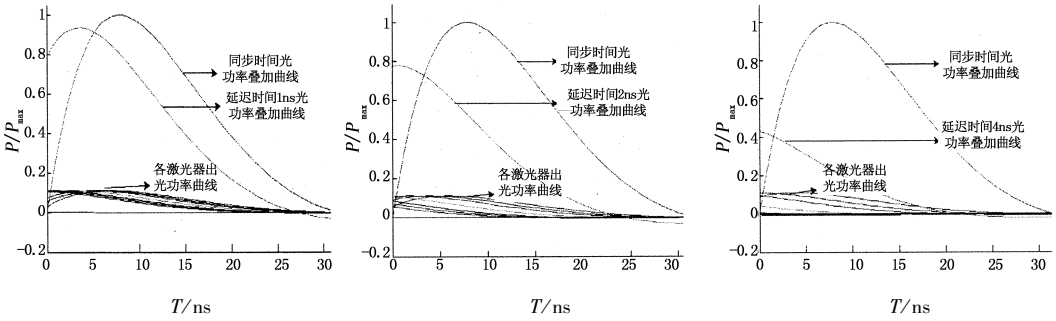
$$P_i=kAe^{-\alpha t}\sin[\omega(t+\varepsilon_i)+\theta]\tag{6}$$

其中,参数 $k,\alpha,A,\omega$ 分别表示比例系数,正弦波的衰减的快慢,电流的幅度和周期;$\varepsilon_i$ 是第 $i$ 个激光器

的延迟时间;$\theta$ 为初始延迟。则总的光功率为:

$$P_{总}=\sum_{i=1}^{M\times N}kAe^{-\alpha t}\sin[\omega(t+\varepsilon_i)+q] \tag{7}$$

采用脉冲半导体激光器进行光束并合时,由于器件工艺等原因,各个脉冲半导体激光器出光时间存在一定偏差,不能满足各个激光二极管时间同步性要求,导致并合光束峰值光强降低,脉宽展宽。采用 Matlab 对 9 个激光器的光束并合后归一化光功率进行仿真。图 2(a)、图 2(b)、图 2(c)分别为各激光器出光时间延迟 1 ns,2 ns,4 ns 情况下归一化光功率随时间的变化规律。




(a)各激光器间依次延迟 1 ns (b)各激光器依次延迟 2 ns (c)各激光器间依次延迟 4 ns

图 2 各激光器延迟时间与归一化光功率

通过上面的仿真分析可以得出,当各个激光器出光时间存在一定的延迟,则激光束合成的光功率下降,脉冲宽度增加,从而损失了一部分的能量。因此,在光束并合中应该尽可能减少各个激光器间出光时间的差异,从而获得更好的光束合成效果。解决同步性的方法很多,目前主要的方法是延迟法[24-25],采用这种方法可以制作出高精度的同步脉冲触发电路,但是这种方法设计较为复杂。一种简单易行的方法是利用 FPGA 器件控制激光器的出光时刻,首先测量各个激光器在同步触发时各激光器出光延迟时间,然后采用 FPGA 对每个触发脉冲时间进行调节,补偿各个激光器的延迟时间,最终使得各个激光器的出光时间相同,这种方法可以有效地图像降低系统复杂度,达到纳秒量级的延迟精度。

### 3.2 同轴性

在激光器光束并合中,为了获得良好的光束质量,需要保证各激光器之间的轴线平行以及激光器与准直光学系统间的同轴。

#### 3.2.1 激光器之间轴线平行性

当多个激光器进行光束并合时,由于各激光器间距远小于远场光斑尺寸,因此只要各激光器轴线平行,就能在远场获得重叠区域一致的光斑。采用两个脉冲半导体激光器进行光束并合实验,激光器并排排列(如图 3 所示),两激光器之间间距 7 cm。实验用激光器的工作波段为 860 nm,单管峰值功率为 300 W,脉冲宽度为 25 ns,重复频率可调,最高为 5 kHz,工作电流为 20 A。通过距离选通实验,测得的光斑图像如图 4 所示,其中图 4(a)是没有调整激光器轴线平行度的图像,图 4(b)是调整后的图像。应用 Matlab 处理计算,可以得到图 4(a)的均匀度(方差与均值比值)为 1.0613,清晰度为 38.3135,信噪比为 14.0813,而图 4(b)的均匀度为 0.9106,清晰度为 60.8375,信噪比为 18.9464。通过上面的数据可以看出,两个激光器轴线没有平性造成光束均匀度差,清晰度差,信噪比降低,严重影响距离选通成像质量。

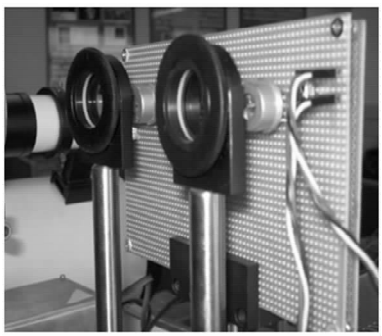
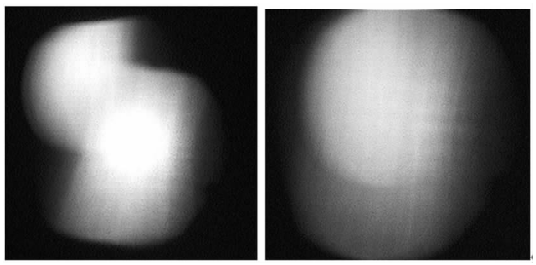


图 3 激光器排列

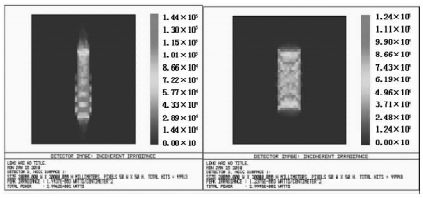


(a)轴线平行度差的图像 (b)改善后的图像

图 4 实验测得光斑

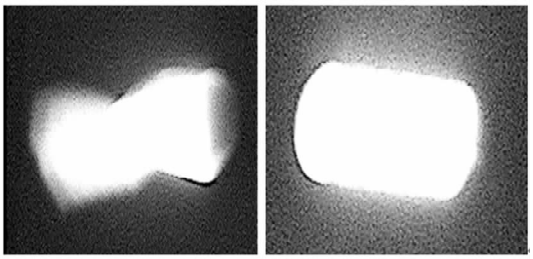
3.2.2　激光器与准直光学系统间的同轴性

激光器与准直透镜间的同轴性直接影响着远场光束的质量好坏[26]。采用 Zemax 对激光器与准直系统的同轴与非同轴仿真情况如图 5 所示。采用激光的距离选通成像所得的光斑如图 6 所示。通过实验图像可以看出,同轴性对光斑的影响与仿真图像变化基本一致,在激光器与准直系统同轴时,远场光斑更加的均匀,而当激光器与准直系统非同轴时,由于激光对称的光线通过透镜所经历的光程不同,造成了光斑在远场畸变、变形,影响了光斑的质量,从而降低成像效果。



(a)非同轴仿真光斑　(b)同轴仿真光斑

图 5　仿真光斑



(a)非同轴光斑　(b)同轴光斑

图 6　实测光斑

改进激光器与准直系统同轴性能的方法可以采用三维的镜架,通过进行三维方向的调整透镜与激光器出光口的位置,从而得到效果好的光斑。而对于多个激光器的情况,可以制作专用镜筒的方法,既可以有效地图像减少光束损失,又可以使得系统更加的紧凑,稳定。

3.3　其他影响因素

除了以上的主要的影响因素以外,还有一些其他的影响因素影响着光束合成的效果,这些因素包括:各个激光器的间距、电源的稳定度等。这些因素对远场光束影响较小,这里不做具体分析。另外半导体激光器故有的发散角大,在远距离的距离选通成像中,还需要设计准直光学系统。

## 4　实验结果与结论

实验发射系统装置如图 7 所示,对远距离楼的侧面成像,成像图像如图 8 所示。实验条件是:激光器与 ICCD 的脉冲宽度均为 60 ns,ICCD 初始延时为 1 μs,增益电压为 3.5 V,重复频率为 500 Hz,激光器初始延时为 80 ns,激光器距离目标距离为 118 m,两个激光器出光时间差值为 1 ns,调整激光器之间的轴线平行度与激光器与准直光学系统平行。

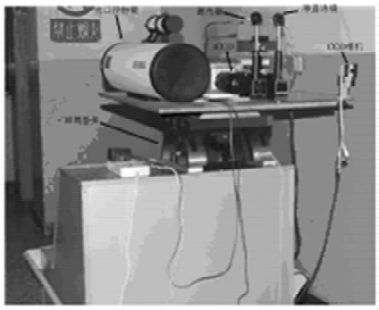
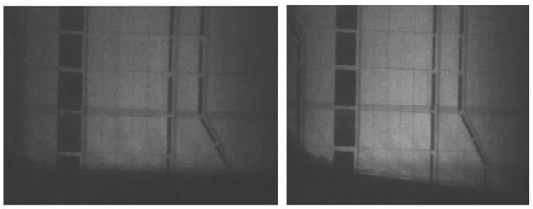


图 7　实验装置图



(a)单个激光管成像　(b)两个激光管并合成像

图 8　实验图像

通过距离选通实验,可以看出采用单个激光器成像与采用两个激光器成像,照射目标的亮度变化,采用两个激光二极管工作时,光斑亮度更强,成像面积加大,细节更加明显,成像质量更好。

采用脉冲半导体激光器进行光束并合时,各激光器的出光时间同步性、各激光器之间的轴线平行度以及激光器与准直光学系统的同轴性是影响并合光束性能的主要因素。通过合理设计,可以使得各个激光器光束在远场得到光强叠加,增加距离选通成像系统的作用距离,并且可以获得均匀的照明光源,降低散斑噪声对成像质量的影响。

**参考文献:**

[1]　Bonnier D, Larochelle V. A range-gated active imaging system for search and rescue and surveillance operations [C]. Proc of SPIE, 1996, 2744: 134 – 145.

[2]　Wang Xiangke, Zhang Hui, Zheng Zhiqiang. Analysis of back-scattering restraining of range-gated imaging technique[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2007, 19(12): 1997 – 2000. (in Chinese)
王祥科,张辉,郑志强. 距离选通技术对后向散射抑制作用的理论分析[J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(12): 1997 – 2000.

[3] Xu Xiaowen, Guo Jin, Yu Qianyang, et al. Key techbique of laser range gated imaging[J]. Laser Technology, 2003, 27(6):603 – 605. (in Chinese)
徐效文,郭劲,于前洋,等. 激光距离选通成像关键技术[J]. 激光技术,2003,27(6):603 – 605.

[4] Fan Pinzhong. The development of common laser source [J]. Laser & Optronics Progress, 2001(1):21 – 24. (in Chinese)
范品忠. 常用激光光源的发展概况[J]. 激光与光电子学进展,2001(1):21 – 24.

[5] Wang Chunhui, Cheng Xiangyang, Tian Zhaoshuo, et al. $CO_2$ Laser radar initiative scanning imaging experiment [J]. Chinese Joutnal of Lasers, 2002, 29(6):569 – 572. (in Chinese)
王春晖,成向阳,田兆硕,等. $CO_2$ 激光主动成像雷达扫描成像实验[J]. 中国激光,2002,29(6):569 – 572.

[6] Kapon E, Katz J, Yariv A. Supermode analysis of phase-locked arrays of semiconductor lasers [J]. Opt. Lett, 1984, 10(4):125 – 127.

[7] Yaeli J, Streifer W, Scifres D R, et al. Array mode selection utilizing an external cavity configuration [J]. Appl-Phys. Lett, 1985, 47(2):89 – 91.

[8] F X DAmato, E T Siebert C. Roychoudhuri. Coherent operation of an array of diode lasers using a spatial filter in a Talbot cavity[J]. Appl. Phys. Lett, 1989, 55(9): 816 – 818.

[9] Shen Hongbin, Li Gang, He Haijun. et. al. Cohwewnt combining of high power fiber laser beams[J]. Laser & Infrared, 2008, 38(9):868 – 871. (in Chinese)
沈洪斌,李刚,何海军,等. 高功率光纤激光器相干合成技术[J]. 激光与红外,2008,38(9):868 – 871.

[10] Wu Jingli, Liu Jingjiao, Xing Zhongbao, et al. Phase controlling methods and experiment of fiber laser coherent combination [J]. Laser & Infrared, 2009, 36(6): 584 – 587. (in Chinese)
武敬力,刘京郊,邢忠宝,等. 光纤激光相干合成中的相位控制方法与实验[J]. 激光与红外,2009,36(6): 584 – 587.

[11] Fan T Y, Sanchez A. Coherent (phase array) and wavelength (spectral) beam combining compared diode laser bars [J]. Proc SPIE, 2004, 5336:1 – 10.

[12] Yu Yi, Wang Weimin, Lu Yanhua, et al. Simulation of spectrally beam combined diode laser based on grating-cavity[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(2):189 – 192. (in Chinese)
于益,王卫民,鲁燕华,等. 二极管光栅 – 外腔光谱合成技术模拟研究[J]. 强激光与粒子束,2008,20(2): 189 – 192.

[13] Yu Yi, Wang Weimin, Lu Yanhua, et al. Experimental reaserch of spectrally beam combined diode laser based on grating-cavity [J]. Laser Technology, 2010, 34(1): 138 – 140. (in Chinese)
于益,王卫民,鲁燕华,等. 二极管激光光谱合成技术实验研究[J]. 激光技术,2010,34(1):138 – 140.

[14] Xu Jie, Zhao Shanghong, Zhou Wanyin, et al. Research on the maximum array with of incoherent fiber beam combination[J]. Laser & Infrard, 2007, 37(8):709 – 711. (in Chinese)
胥杰,赵尚弘,周万银,等. 对非相干光纤激光组束系统最大阵列宽度的研究[J]. 激光与红外,2007, 37(8):709 – 711.

[15] Xin Guofeng, Chen Guoying, Feng Rongzhu, et al. InGaAs/AlGaAs Semiconductor laser 2-D arrays[J]. Chinese Joutnal of Laser, 2003, 30(8):684 – 686. (in Chinese)
辛国锋,陈国鹰,冯荣珠,等. InGaAs/AlGaAs 半导体激光器二维阵列[J]. 中国激光,2003,30(8):684 – 686.

[16] Zhang Xiaobo, Gao Dingsan. Hybrid two-dimensional surface emitting semiconductor laser arrays [J]. Chinese Journal of Lasers, 1993, 19(1):16 – 18. (in Chinese)
张晓波,高鼎三. 组合式二维列阵面发射半导体激光器[J]. 中国激光,1993,19(1):16 – 18.

[17] Tang Yuxia. Superpower semiconductor laser array and its application[J]. Journal of Chongqing Technology and Business university, 2006, 23(5):514 – 528. (in Chinese)
唐裕霞. 高功率半导体激光器阵列及其应用[J]. 重庆工商大学学报,2006,23(5):514 – 528.

[18] Jandeleit J, Wiedmann N, Loosen P, et al. Reliability and degradation mechanisms of high power diode lasers[J]. SPIE, 1999, 3626:216 – 221.

[19] Dong Hongcheng, Tao Chunxian, Zhao Yuan′an, et al. Combination characteristics of gaussian beams[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2009, 21(2): 170 – 176. (in Chinese)
董洪成,陶春先,赵元安,等. 高斯光束的合成特性分析[J]. 强激光与粒子束,2009,21(2):170 – 176.

[20] Zhou Pu, Liu Zejin, Xu Xiaojun. Influence of atmospheric turbulence on far-field beam quality of coherent and incoherent combined Laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(5):1042 – 1046. (in Chinese)
周朴,刘泽金,许晓军. 湍流对相干合成与非相干合成

远场光束质量的影响[J]. 中国激光 2009,36(5):1042 - 1046.

[21] Xiong Lingling, Lü Baida. Theoretical models describing far-field intensity distributions of laser diode[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(2): 201 - 206. (in Chinese)
熊玲玲,吕百达. 描述激光二极管远场光强分布的理论模型[J]. 强激光与粒子束,2008,20(2):201 - 206.

[22] Wang Yusan, Zhang Zhonghua, Lin Dianyang. Photoelectronic principle and application[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2005: 135 - 142. (in Chinese)
王雨三,张中华,林殿阳. 光电子学原理与应用[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版,2005:135 - 142.

[23] Yan Bing. Analysis of pulsed laser diode driver circuit [J]. Optics & optoelectronic technology, 2008, 6(4): 1 - 3. (in Chinese)
严兵. 脉冲半导体激光器电源电路分析[J]. 光学与光电技术,2008,6(4):1 - 3.

[24] Dai Gang, Gao Ping, GuoYushan, et al. Design and realization of nanosecond digital delay and puls generator[J]. Chinese Joutnal of Scientific Instrment, 2006 (z1): 999 - 1000. (in Chinese)
代刚,高平,郭玉山,等. 纳秒演示同步脉冲产生器的设计与实现[J]. 仪器仪表学报, 2006 (z1): 999 - 1000.

[25] Li Hui, Liu Baiyu, Ouyang Xian, et al. Research of the distributed digital delay pulse generator in the prototype of laser system[J]. Acta Photonica Sinica, 2004, 33(7): 786 - 788. (in Chinese)
李辉,刘百玉,欧阳娴,等. 激光打靶装置中的集散式数字同步系统的研究[J]. 光子学报,2004,33(7):786 - 788.

[26] Gou Zhiyong, Wang Jiang, Zhang Yue, et al. Study on beam shaping of collinear single prism[J]. Optical Instruments, 2006, 28(2): 42 - 45. (in Chinese)
勾志勇,王江,张悦,等. 同轴单棱镜整形研究[J]. 光学仪器,2006,28(2):42 - 45.